

Cette étude est consacrée à l'effet physique des intrusions magmatiques en tant que générateur de chaleur capable d'induire la mise en place de larges cellules de convection. Deux principales questions ont été évaluées : l'intrusion est-elle à elle seule capable de créer des conditions advectives favorables à la formation d'une minéralisation ? Si, oui, quelles sont les contraintes temporelles depuis l'emplacement du magma jusqu'à la précipitation des minéraux utiles ?

Ci-dessous sont résumés, les principaux résultats basés sur une approche numérique ainsi que sur l'étude d'un cas naturel spécifique :

1. Modélisation numérique couplée hydro-thermale et probabilité de minéralisation : nouveaux apports.

De nouveaux modèles numériques de circulations de fluides autour de plutons ont été réalisés dans cette étude. Cette modélisation par éléments finis couple les équations de transfert de la chaleur à la loi de Darcy par un jeu de grandeurs et paramètres physiques entièrement interdépendants. Cependant, afin de bien résoudre les questions liées à l'hydrodynamisme de tels systèmes, ces modèles restent simples et axés sur la seule physique des écoulements : les fluides multiphasés, la diffusion chimique, la topographie et la production de fluides par les magmas ne sont pas simulés.

Les innovations principales sont les suivantes : i) la perméabilité varie de façon continue avec la profondeur suivant une loi puissance. Aucune discrétisation n'a donc été nécessaire ; ii) les modèles sont transitoires et permettent un pas de temps précis ainsi que l'étude du flux de fluide pendant la mise en place de l'intrusion, et pas seulement pendant la phase de refroidissement ; iii) les simulations mettent un jeu de grands plutons mis en place dans une section de croûte continentale atteignant la profondeur de 24 km. Ceci permet d'explorer des plutons asymétriques ainsi que la zone sous l'intrusion ; iv) A notre connaissance, pour la première fois dans ce type de modélisation péri-plutonique, des modèles 3D ont été calculés avec succès aboutissant à des résultats importants ; v) un nouvel indice de probabilité de minéralisation a été défini (R^2AI) ; il apparaît extrêmement fiable lorsque des comparaisons sont faites avec des gisements naturels.

2. Le rôle de la profondeur d’emplacement du pluton.

La perméabilité des roches encaissantes est liée dans les modèles étudiés à la profondeur. La profondeur d’emplacement du pluton joue donc un rôle fondamental en modifiant fortement l’hydrodynamique classique à deux cellules de convection connues pour les plutons supra-crustaux depuis les études pionnières sur ce sujet.

Les plutons mis en place à une profondeur supérieure à 10 km n’induisent pas d’advection significative, le transfert de chaleur est exclusivement conductif. Ceci est cohérent avec le peu d’altération hydrothermale observée autour de plutons mis en place à la limite ductile fragile de la croûte continentale.

Pour des profondeurs d’emplacement inférieures à 4.5 km, le seuil de perméabilité de 10^{-16} m^2 est atteint et des cellules de convection de second ordre induisent des zones de décharge supplémentaires propices au dépôt de phases minérales. Autour de ces plutons peu profonds, d’importantes augmentations des vitesses sont reconnues (deux ordres de grandeur).

Il apparaît également que la zone sous jacente au pluton est peu favorable, ce qui est cohérent avec le peu de gisements de ce type localisés en base d’intrusion.

3. Les effets de la géométrie du pluton et des apex.

Pour des volumes équivalents de magma, les formes de pluton tabulaires (laccolithe) engendrent des zones de forte probabilité de minéralisation bien plus étendues que celles induites par d’autres géométries de pluton. Cette zone favorable occupe une large surface dans les roches encaissantes au-dessus du laccolithe. Les apex de faible hauteur de pluton mis en place profondément jusqu’à 8 km n’engendrent aucun effet sur l’hydrodynamique autour du corps magmatique.

Par contre, des apex très longs, qui atteignent des zones au dessus du seuil de perméabilité, provoquent des changements importants dans la circulation des fluides. Ces grands apex, similaires aux intrusions de type porphyres, re-localisent et focalisent les cellules de convections autour d’eux plutôt qu’autour du pluton parent principal. Ce point doit avoir des conséquences importantes dans la genèse des porphyres cuprifères.

4. Le rôle des zones de haute perméabilité : les auréoles fracturées et les failles.

A l’inverse des apex courts, les auréoles thermiques fracturées jouent un rôle important sur la distribution des zones favorables de minéralisation autour des plutons intermédiaires à profonds.

Ces auréoles fracturées restreignent et localisent fortement le flux des fluides et les zones favorables aux bordures et surtout aux coins des intrusions. Il est remarquable que pour les cas naturels de gisements d'or associés à des granites, ces « coins » de pluton sont effectivement riches en minéralisation. Les détachements extensifs synchrones de la mise en place d'un pluton (cas classique dans les « metamorphic core complexes » pendant l'extension post orogénique) sont capables de changer drastiquement la distribution des fluides autour du pluton. Ces failles plates sont très « efficaces » pour pomper les fluides mis en mouvement par convection thermique et localiser des zones probables de minéralisation. C'est une différence importante avec les failles à fort pendage.

5. La thermo-chronologie et le lien génétique de l'intrusif dans le processus de minéralisation.

Tout d'abord, pour de grands pluton souvent mis en place par injections successives depuis les zones d'alimentation, la phase de refroidissement n'est pas la phase de convection maximale des fluides de l'encaissant. L'advection de chaleur et les zones les plus probables de minéralisation peuvent se mettre en place légèrement avant ou pendant la phase de température maximum dans le pluton (i.e. avant que le magma ne cristallise complètement).

De plus, pour des intrusions de la croûte supérieure, les conditions physiques favorables pour une précipitation minérale se réalisent pendant un court laps de temps encadrant la phase de température maximale du pluton. C'est pourquoi nous pensons que, malgré le manque d'arguments chimiques (e.g. haute salinité dans les inclusions fluides), les gisements aurifères associés à des granites peuvent s'expliquer d'un point de vue hydrodynamique par les seules convections hydrothermales induites lors de la mise en place du magma granitique. Dans ce cas le granite a bien un rôle génétique, sa chimie (granite de type réduit souvent) pouvant éventuellement contribuer à fournir les éléments utiles. Cependant, le volume d'encaissant lessivé par les fluides convectifs est tel que (importante altération hydrothermale, métasomatose...) pour certaines concentrations minérales peri-granitiques (e.g. Pb, Zn), la contribution de l'intrusif pourrait se réduire uniquement à son rôle thermique (déclenchement des cellules hydrothermales).

6. Un cas naturel spécifique : le système W-Au associé au granite de Tighza (Maroc central)

Le pluton de Tighza offre un vrai défi pour améliorer la compréhension du rapport entre l'intrusion et la minéralisation aurifère. Précédemment, des études détaillées ont été faites au

sujet de la minéralisation de Tighza pour obtenir le grade de docteur (Cheilletz, 1984; Nerci, 2006). Cheilletz (1984) a proposé un âge pour le granite de la mine (286 Ma) et pour la minéralisation aurifère (285 Ma). Par contre, Nerci (2006) a proposé un âge de 291 Ma pour la minéralisation aurifère dans le filon W1 nord et 286 Ma pour le granite de la mine.

Nous présentons une nouvelle méthode pour interpréter le rapport spatial et le lien génétique (donc temporel) entre l'activité magmatique et la minéralisation aurifère, ainsi que, l'âge problématique obtenu pour la minéralisation aurifère du filon W1.

A partir de mesures de gravité, la forme 3D de l'intrusion de Tighza a été établie. Les architectures simplifiées 3D du pluton, et du filon W1, interprété comme une zone perméable, ont été alors injectées dans la modélisation couplée numérique 3D définie au chapitres précédents. Cette approche nous permet de comparer, explorer et discuter : i) la distribution de la minéralisation aurifère à Tighza; ii) la relation thermo-chronologique, et par conséquent, le lien génétique entre l'intrusion et la minéralisation aurifère.

Du fait de l'intégration d'une géométrie 3D complexe, le modèle de Tighza obtenu devient plus réaliste même s'il est simplifié en comparant au contexte géologique réel. Bien que beaucoup de paramètres n'ont pas été pris en compte, telle que la réaction chimique, la production des fluides magmatiques, ce modèle donne un nouvel éclairage sur les concepts des intrusions à enveloppes de minéralisation.

L'apparition d'une zone probable de minéralisation au début de la mise en place prouve que les conditions physiques favorables sont disponibles avant la phase la plus chaude ou avant son refroidissement pour former des gisements. En effet, le filon W1 représente la zone la plus probable pour la minéralisation, là où la perméabilité est relativement élevée; c'est donc une zone favorable pour que les fluides circulent plus rapidement depuis la proximité du corps magmatique jusqu'aux zones froides où ils perdent leur température et leur vitesse, favorisant ainsi la précipitation de minéraux. Pour cette raison, W1 devient la zone la plus probable pour la minéralisation au début de la mise en place. Cette zone s'étend pour couvrir la totalité de la zone autour du granite à la phase la plus chaude de la mise en place.

La perturbation thermique diminue immédiatement pendant la cristallisation du corps magmatique après 0.6 Ma. L'application des contraintes thermiques liée à la température de fermeture isotopique avec le R²AI montre la possibilité de créer des conditions physiques favorables pour le dépôt d'une minéralisation plus jeune que l'âge de refroidissement du granite parent. Cependant, les expériences numériques montrent que, pour un même minéral,

les âges de refroidissement (i.e fermeture isotopique) de la minéralisation et du granite ne peuvent être séparés de plus de quelques centaines de milliers d'années. Par conséquent, la datation obtenue pour la minéralisation dans le filon W1 nord (291Ma) correspond à un évènement hydrothermal antérieur, sans connexion avec l'hydrothermalisme induit par le granite de Tighza (286Ma).

Ainsi, ces résultats numériques sont cohérents avec les âges obtenus par Cheilletz (1984) et Nerci (2006) pour la minéralisation W-Au (285 Ma), c'est-à-dire très proches de celui du granite (286 Ma). Ces résultats sont compatibles aux évaluations de Cathles (1981b) qui estime la vie maximum d'un système hydrothermal « efficace » (au sens minéralisant) dû à une intrusion à 800.000 ans, en conditions optimales.

The hydrothermal mineralization is a subject to debate in numerous cases where mineral deposits are spatially related to magmatic intrusions. In most of cases, the question is about the role of intrusion: what is the exact contribution of the intrusion on ore deposition? Rheological, structural, Thermal, and/or Chemical? Coupled with dating consideration, the balance between these contributions defines the degree of genetic link of the intrusion within the ore forming process. As mentioned in Chapter I, intrusion-related ore deposits constitutes our main source of Cu, Mo, Sn, W, and Bi, and a significant source of Au, Ag, Fe, Pb, and Zn. Styles of mineralization vary from vein, skarn, and greisen to porphyry type. Deciphering between physical and chemical contributions of the intrusion is then interesting for exploration strategy. Models of the genesis of these types of deposits have evolved significantly over time, from early days when the intrusions were regarded as the source of all components of the ore deposits (i.e. strong genetic link), to a time when most researchers regarded the intrusions only as heat sources (i.e. subtle genetic link), driving large convection cells of metamorphic and/or meteoric waters which leached metals out of the surrounding country rocks.

Finally, in some case, the intrusion is only spatially associated with ore deposits, the magmatic body being reduced to play the role of a structural or rheological trap (i.e. no genetic link). In contrast, in Cu-Mo porphyries and polymetallic skarns, fluid inclusions, mineralogy and/or stable isotope studies provide very strong chemical arguments for a genetic link between the intrusion and ore deposits. Indeed, high salinities measured within mineralizing fluid suggest an important contribution of magmatic waters expelled from the parent intrusion. On the contrary, granite related gold deposits present a very subtle link with no clear evidence of a magmatic contribution in the ore forming process. This thesis focused on the question of physical effects of intrusion in ore genesis as a heat source driving convection cells. Two main questions were evaluated:

Is the intrusion able to create alone, favorable physical conditions for ore formation? If yes, what are the chronological constraints between intrusion emplacement and ore formation?

To answer the questions, the results of numerical modeling supported by natural cases have been summarized.

1. Hydro-thermal numerical modeling and ore deposition probability (new insights)

A new fully coupled hydro-thermal modeling has been developed during this study. The modeling procedures have been benchmarked by published models. Our models are simple

physical models which do not simulate i) multiphased fluid productions; ii) chemical diffusion, iii) topography, iv) input of meteoric and magmatic waters. Nevertheless, the main innovations are: i) the permeability of host rocks has been varied continuously with depth with no need of discretization; ii) the models are transient for a precise time stepping, taking into account the warming phase (i.e. emplacement of magma) as well as the cooling phase; iii) models represent large plutons intrud within a thick section of the continental crust (24 km depth). This allows exploring asymmetric plutons with apexes and/or associated faults. Hence, fluid flow patterns beneath the pluton are also explored; iv) 3D hydro-thermal modeling of complex pluton architecture associated with fault has been successfully realized and has led to important results; v) a Restricted Rock Alteration Index (R^2AI) has been defined to evaluate the physical probability of mineral precipitation. This index appears to be powerful indicator when a comparison with well-constrained natural cases is made.

2. The role of emplacement depth of pluton

As previously shown for upper crustal plutons in pioneering works, the emplacement of magma creates a thermal perturbation within the surrounding rocks triggering an effective zone of advection. Two convective cells are created above simple intrusion geometry; the cell in the left side is anticlockwise, while the cell in the right side is clockwise. However, fluid circulation and mineralization patterns are strongly dependent of the emplacement depth of pluton (as depth and permeability are related by a power law). Deep seated plutons emplaced below 10 km and not connected to high permeability zones do not induce advective heat dissipation. This was confirmed by Peclet number distribution which is coherent with absence of convective cells and decrease in fluid velocities. This is also coherent with the weak hydrothermal alteration observed around the deep seated plutons (e.g. Annen et al, 2006). Above 4.5 km, the permeability threshold of 10^{-16} m^2 is reached and second order convection cells may create additional convection cells which triggers supplementary focused discharge zones where mineralization are expected. Around shallow plutons significant increase in fluid velocity were also identified (from 10^{-10} to 10^{-8} m.s^{-1}). Another important result is that, for all emplacement depth, the pluton floor zone seems to be not favorable for mineral deposition. Based on our knowledge, intrusion related ore deposits flanking the floor zone of the co-genetic intrusion are not reported.

3. Effects of pluton geometry and apexes

For equivalent magma volume, the tabular-like form (i.e. laccolith) is a convenient shape to produce a favorable mineralized zone larger than those produced by other forms (figure III.15), because it covers a wide horizontal area in the host rock above the pluton.

No significant role was remarked for small apexes of deep or intermediate intrusions where the permeability of host rock is too low. However, a long apex that reaches shallow zones where permeability is greater than 10^{-16}m^2 creates a dramatic change in distribution of probable zone of mineralization. In that case, the apexes strongly modified the fluid flow pattern by focusing convective fluids and mineralization zones around them. Apexes are then able to relocate the convective cells and discharge zones along them rather than around the main magma body. This result suggests that, although porphyry deposits record important magmatic waters inputs, the relocation of convective fluids along the apical intrusion (i.e. the porphyry), may play an important role (see example of the Cu-Au Grasberg, figure III.14a). This is particularly valid to explain fluid mixing observed in some cases or at some stage of the paragenetic succession.

4. The role of high permeability zones: fractured thermal aureoles and faults

Due to volume forces and fluid overpressure (expelled from crystallizing magma), thermal aureoles around intrusions are often fractured, acting as high permeability zones. In contrast with apexes, fractured aureoles play significant role in distribution of favorable zone of mineralization around deep and intermediate intrusions. They are able to restrict and localized fluid flow, discharge zones and favorable mineralized zones, very close to the pluton border and edges. This is in agreement with the location of deep intrusion related gold deposits with or without apex [e.g. the Bruès gold deposit at the upper north corner of Boborás pluton figure (III.13a), Galicia, Spain; the Scheelite dome gold deposit figure (III.13b), Yukon, Canada].

Extensional detachments faults are able to delocalize and strongly modify classical fluid flow patterns induced by coeval intrusion. Indeed, the probability of potential zone of mineralization around intrusion was removed from the zone around pluton and restricted within the fault. A very good agreement was found with the Crocetta deposit in Elba, Italy (figure (III.14b). Elba central detachment fault is a very efficient advective drain. It is able to pump fluids from deep zones and makes them circulate along the horizontal branch of the pluton-induced convection cells. Extensional systems do not required lithostatic fluid overpressure to develop dilatant sites susceptible to drain and/or to trap mineralization. In that

sense, it is surprising that very few ore deposits are recognized in context of detachment faults associated to metamorphic core. This constitutes an important difference with high angle dip fault.

5. Time evolution and the genetic link of intrusion in the ore deposition

The cooling phase is not the main phase of convection for large pluton often associated with long-lived magma emplacement. Major advective heat dissipation and mineral deposition zone may also occur sometime before and during the hottest phase of emplacement (before magma crystallizes). This is an important clue to interpret dating (emplacement and cooling age) of thermal aureole and intrusion-related ore deposits.

We conclude that, even if chemical arguments are absent, fluid circulation induced by granite emplacement plays a key role in the genesis of granite-related Au deposits. Then, the role of intrusion appears to be clearly genetic for this kind of ore deposits, and mineralization might be nearly coeval with the hottest phase of intrusion.

Finally, the pure physical indicator (R^2AI) reproduces accurately in time and space the location of intrusion related deposits of natural resources, for different natural examples. That means that convection of metamorphic and/or meteoric fluids induced by the intrusion appears to be a major physical key to explain the spatial distribution of ore around a magmatic body. Input of magmatic fluids within such localized convective systems might only contribute to the chemistry of the ore forming process.

6. The natural case: granite-related W-Au deposits (Tighza-Morocco)

This example has been specifically studied during this work. In the Tighza area, the thermal perturbation, which triggered an important hydrothermal alteration and ore deposit, comes from a hot intruded body (286 Myr). The thermal aureole is well-developed, absolute dating and metallogeny data are well-constrained, and the complex morphology of the pluton is attested by the occurrence of three main apexes spatially associated to W-Au mineralization. In the first step, based on a detailed gravimetric study in the field, density measurements, cartography and structural analysis, the complex 3D shape of the intrusion has been characterized with a good approximation. The 3D model has been realized following the inversion procedure of the Bouguer anomaly constrained by geological cross-sections. The resulting architecture corresponds to a flat lying intrusion with three main apexes and at least two roots (i.e. feeder zones). The pluton was limited to the north by the main Tighza fault. In the second time, the coupled hydro-thermal modeling procedure, defined above, has been

applied to a simplified 3D model of the Tighza area (including pluton geometry and mineralized fracture “W1”). The emplacement depth of the intrusion has been evaluated by fluid inclusion data from previous studies. The experiments show that, during the incipient emplacement of magma, the fracture W1 represents the most probable zone for mineralization. This zone extends to cover the entire zone around granite at the hottest phase of emplacement. The thermal perturbation decreases rapidly during crystallization of intruded body after 0.6Myr. Tentative correlation between the model and absolute dating available for Tighza deposit has been realized, accounting for closure temperature of isotopic systems. The convergence between isotopic closure temperature and R^2AI is confirmed by the appearance of favorable physical conditions and the average of isotopic closure temperature in W1 around the hottest phase, and before magma crystallizes (figure IV.14). However, after the hottest phase, the time-lag to close the isotopic system within the granite couldn't be longer than 0.1Myr. Therefore, the age of (291Myr) measured in W1 north (Nerci, 2006) does not date the hydrothermal event coeval to the Tighza pluton. It might be linked to a previous hydrothermal event. Related to the age of the intrusion (286 Myrs), these numerical results are in agreement with other ages measured by Cheilletz (1984) and Nerci (2006) for the W-Au mineralization (285 Myr).

7. Future work

Although, the results presented in this thesis provide significant new insights into magma emplacement and related hydrothermal circulations. In particular, the effects of magma emplacement and the variation of different thermal and physical parameters in hydrothermal circulation and consequently ore formation.

The potential exists for further works: 1) the geochemistry has to be incorporated in the coupled modeling through the chemical diffusion equation. 2) the magmatic fluid production at the end of magma crystallization, the chemical reaction at the rock wall between host rock and magmatic elements could bring new insights for this type of geo-systems. 3) Creating a realistic mechanical system able to form inhomogeneous and deformed temporal permeability is also important for more realistic model. Based on these parameters with a realistic geometry of pluton, we can be more specific and simulate more complicated examples for more deep exploration method.